

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ URČENÝCH PRO NÁVRH  
OPTICKÝCH DATOVÝCH SÍTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL DUFEK

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ URČENÝCH PRO NÁVRH OPTICKÝCH DATOVÝCH SÍTÍ**

COMPARISON OF SIMULATION PROGRAMS FOR THE DESIGN OF OPTICAL DATA  
NETWORKS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MICHAL DUFEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PETR MÜNSTER, Ph.D.**

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# **Bakalářská práce**

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Michal Dufek

**ID:** 158123

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## **NÁZEV TÉMATU:**

**Porovnání simulačních programů určených pro návrh optických datových sítí**

## **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem bakalářské práce je srovnání simulačních programů určených k návrhu datových sítí. Testovány budou programy OptSim, OptiSystem, VPIphotonics, ns-3 a OMNeT++. Kromě srovnání základních parametrů a možností jednotlivých prostředí bude v každém simulačním prostředí proveden návrh optické datové sítě s přenosovou rychlostí 1 Gbit/s. Výsledky simulací budou podrobeny detailní diskuzi.

## **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] FILKA, M. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] CRISP, J. and BARRY, J., E, Introduction to Fiber Optics. Amsterdam: Newnes, 2005. eBook

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá porovnáním pěti simulačních programů určených pro optickou síť. V každém simulačním programu bude simulován optický přenos kódování NRZ na rychlostech 1 Gbit/s a 10 Gbit/s. Následně se provede porovnání výsledků simulací a na jejich základě se porovnájí simulační programy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

OptSim, OptiSystem, VPI, NRZ, BER, oko rozhodnutí

## **ABSTRACT**

This work deals with comparison five simulation software for optical network. In each simulation program will be simulated optical transmission of NRZ coding at speeds 1 Gbit/s and 10 Gbit/s. Subsequently is carried out comparison of results of simulations and on this basis to compare simulation programs.

## **KEYWORDS**

OptSim, OptiSystem, VPI, NRZ, BER, Eye Diagram

DUFEK, Michal *Porovnání simulačních programů určených pro návrh optických sítí*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 46 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Porovnání simulačních programů určených pro návrh optických sítí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	11
<b>1 Popis simulačních programů</b>	<b>12</b>
1.1 Optiwave	12
1.1.1 OptiBPM	12
1.1.2 OptiFDTD	12
1.1.3 OptiFiber	13
1.1.4 OptiGrating	13
1.1.5 OptiSPICE	13
1.1.6 OptiSystem	14
1.2 VPIphotonics	14
1.2.1 VPIlinkConfigurator	14
1.2.2 VPI Fiber Optic	15
1.2.3 VPI Photonic Circuits	15
1.2.4 VPI Optical System	15
1.3 OptSim	16
1.4 Network Simulator 3	17
1.5 OMNeT++	18
<b>2 Kódování NRZ a oko rozhodnutí</b>	<b>20</b>
2.1 Oko rozhodnutí	20
2.1.1 Q-faktor	20
2.1.2 Bitová chybovost kanálu (BER)	21
2.1.3 Odstup signálu od šumu (SNR)	21
<b>3 Prostředí simulačních programů</b>	<b>23</b>
3.1 OptSim - Prostředí simulačního programu	23
3.1.1 OptSim - Vytvoření projektu	23
3.2 OptiSystem - Prostředí simulačního programu	24
3.2.1 OptiSystem - Vytvoření projektu	24
3.3 VPI - Prostředí simulačního programu	25
3.3.1 VPI - Vytvoření projektu	25
<b>4 Výsledky simulací v programech</b>	<b>27</b>
4.1 Nastavení parametrů	27
4.2 Program OptSim	27
4.2.1 OptSim - Schéma zapojení	27
4.2.2 OptSim - Výsledky simulace přenosu NRZ kódování pro 1 Gbit/s	28



4.2.3	OptSim - Výsledky simulace přenosu NRZ kódování pro 10 Gbit/s	29
4.3	Program OptiSystem . . . . .	30
4.3.1	OptiSystem - Schéma zapojení . . . . .	30
4.3.2	Optisystem - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 1 Gbit/s . . . . .	31
4.3.3	Optisystem - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 10 Gbit/s . . . . .	32
4.4	Program VPI . . . . .	33
4.4.1	VPI - Schéma zapojení . . . . .	33
4.4.2	VPI - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 1 Gbit/s .	34
4.4.3	VPI - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 10 Gbit/s	34
4.5	Ověření funkčnosti disperzí . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Shrnutí výsledků a porovnání simulačních programů</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>40</b>
	<b>Literatura</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Obsah CD</b>	<b>46</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Oko rozhodnutí [17] . . . . .	21
2.2	Souvislost Q-faktoru v oku rozhodnutí [18] . . . . .	22
2.3	Souvislost SNR v oku rozhodnutí [18] . . . . .	22
3.1	Prostředí simulačního programu OptSim . . . . .	23
3.2	Prostředí simulačního programu OptiSystem . . . . .	24
3.3	Prostředí simulačního programu VPI . . . . .	25
4.1	Schéma zapojení pro NRZ v OptSim . . . . .	28
4.2	Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 1 Gbit/s . . . . .	28
4.3	Oko rozhodnutí a optické spektrum za filtrem ve vzdálenosti 124 km pro 1 Gbit/s . . . . .	29
4.4	Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 10 Gbit/s . . . . .	29
4.5	Oko rozhodnutí a optické spektrum za filtrem ve vzdálenosti 75 km pro 10 Gbit/s . . . . .	30
4.6	Schéma zapojení pro NRZ v Optisystem . . . . .	31
4.7	Optické spektrum za Amplitude modulator pro 10 Gbit/s . . . . .	31
4.8	Oko rozhodnutí a optické spektrum za 3R Regenerátorem ve vzdále- nosti 125 km pro 1 Gbit/s . . . . .	32
4.9	Oko rozhodnutí a optické spektrum za Amplitude modulator pro 10 Gbit/s . . . . .	32
4.10	Oko rozhodnutí a optické spektrum za 3R Regenerátorem ve vzdále- nosti 65 km pro 10 Gbit/s . . . . .	33
4.11	Schéma zapojení pro NRZ ve VPI . . . . .	34
4.12	Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 1 Gbit/s . . . . .	35
4.13	Oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 100 km pro 1 Gbit/s	36
4.14	Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 10 Gbit/s . . . . .	36
4.15	Oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 67 km pro 10 Gbit/s	37

## SEZNAM TABULEK

5.1	Tabulka naměřených hodnot pro přenos 1 Gbit/s . . . . .	38
5.2	Tabulka naměřených hodnot pro přenos 10 Gbit/s . . . . .	38

# ÚVOD

V dnešní době existuje mnoho simulačních prostředí pro telekomunikační sítě, jak pro komerční použití, tak i s volnou licenci. Tato práce se zabývá porovnáním pěti simulačních programů. Jedná se o komerční programy od společností Optiwave a VPI a program OptSim od Synopsys. Pro nekomerční a akademické účely jsou testovány programy OMNeT++ a Network Simulator 3 (NS-3).

Cílem bakalářské práce je vytvořit simulaci optického přenosu v těchto programech a následně výsledky dosažené simulací navzájem porovnat. Dále se porovnají programy na základě jejich prostředí.

Práce je rozdělena na pět částí. V první kapitole se práce zaměřuje na základní popis programů. V další kapitole se popisuje použité kódování NRZ, jenž je použito pro simulaci, a popis diagramu oka rozhodnutí. V následující kapitole se nachází popis prostředí jednotlivých programů. Čtvrtá kapitola se už zaobírá samotnou simulací kódování NRZ v programech. V poslední kapitole je shrnutí s výsledky ze simulací a je zde provedeno porovnání programů.

# 1 POPIS SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

## 1.1 Optiwave

Optiwave je kanadská společnost zabývající se vývojem inovativních softwarových nástrojů pro návrh, simulaci a optimalizaci komponentů, systémů a sítí pro dynamicky rozvíjející se oblasti fotonických nanotechnologií, optoelektroniky, optických sítí a dalších fotonických aplikací. Společnost nabízí šest programů s různými účely, které jsou popsány níže. Všechny jejich produkty jsou určeny pro komerční použití a tudíž jsou placené. Nabízí také možnost si tyto programy vyzkoušet s 30 denní licenci, jak pro nové zákazníky, tak pro akademické účely.

### 1.1.1 OptiBPM

OptiBPM je komplexní CAD prostředí používaný pro návrh složitých optických vlnovodů. Na základě BPM (Beam Propagation Method) lze provést simulaci průchodu světla přes jakýkoliv vlnovod. OptiBPM umožňuje návrhářům sledovat rozložení světelného pole a zkoumat záření současně pomocí počítačové simulace. OptiBPM přináší významné funkce, jako je například schopnost definovat a používat anizotropní materiály pro rozvržení návrhu a simulaci vlnovodu[1].

#### **Aplikace/funkce OptiBPM:**

- Návrh optických rozbočovačů, slučovačů, spojek, multiplexorů a modulátorů
- Velká škála možností konstrukce optických obvodů
- Možnost vytvořit nesymetrické struktury vlnovodů
- Konstrukce páteřních vlnovodů
- Struktury senzorů

### 1.1.2 OptiFDTD

OptiFDTD umožňuje navrhovat, analyzovat a testovat moderní pasivní a nelineární komponenty pro šíření vln, rozptyl, odraz, difrakci, polarizaci a nelineární jevy. Jádro programu OptiFDTD je založeno na Finite-Difference Time-Domain (FDTD) algoritmu s numerickou přesností druhého řádu a nejpokročilejšími okrajovými podmínkami - Uniaxial Perfectly Matched Layer (UPML). Algoritmus řeší jak elektrická, tak i magnetická pole v časové a prostorové oblasti použitím plného vektoru diferenciální formy Maxwellovy rovnice. To umožňuje pro libovolné modely a to bez omezení materiálových vlastností zařízení[2].

#### **Aplikace/funkce OptiFDTD:**

- Difrakční mikrooptické prvky a čočky

- Nelineární materiály, disperzní materiály
- Mřížka na bázi struktury vlnovodu
- Elektromagnetické jevy
- Nanočástice

### 1.1.3 OptiFiber

OptiFiber je program pro návrh optických vláken. Používá numerické režimy a další modely specializované na vlákna pro výpočty disperzí, ztrát, dvojlomů a PMD[3].

**Aplikace/funkce OptiFiber:**

- Real fiber sample
- Single mode fiber
- Dispersion shifted fiber

### 1.1.4 OptiGrating

OptiGrating používá teorii spojených režimů (Coupled Mode Theory) k vytvoření světla a umožňuje analýzu a syntézu mřížek. Komplexní mřížka je aproximována sekvencí jednotných segmentů a analyzována spojenými segmenty ze známé Transfer Matrix Method. Projektant tak dostává potřebné informace k testování a optimalizaci mřížky[4].

**Aplikace/funkce OptiGrating:**

- Rekonstrukce neznámé mřížky
- Senzory
- Fiber Bragg Grating

### 1.1.5 OptiSPICE

OptiSPICE je software pro analýzu integrovaných obvodů včetně interakcí optických a elektronických součástek. To umožňuje návrh a simulaci na úrovni tranzistorů, od laserových ovladačů až po transimpedanční zesilovače, optické propojky a elektronické ekvalizéry. OptiSPICE vytváří ucelené řešení optoelektronických obvodů, které obsahuje zpětnou vazbu jak pro optické tak elektrické části. OptiSPICE je vhodné integrované řešení pro extrakci parametrů, schématické znázornění, simulaci spojů a analýzu průběhů[5].

**Aplikace/funkce OptiSPICE:**

- Přepínání kanálu na základě MEMS
- Elektroabsorbční modulátor
- Kruhové přepínání
- VCSEL řada

- Návrh ovládání energie

### 1.1.6 OptiSystem

OptiSystem je obsáhlý software s projektovou soupravou, která umožňuje plánovat, testovat a simulovat optické spojení na přenosové vrstvě moderních optických sítí. Program obsahuje knihovnu s více než 300 přizpůsobitelnými komponenty. Na stránkách společnosti lze nalézt několik desítek návodu pro různá zapojení a funkce programu na analýzu.[6]

#### **Možnosti programu:**

- DWDM, CWDM
- RoF (Radio over Fiber), mikrovlnné optické spojení
- Kódování Manchester, PAM
- Digitální modulace - DPSK, QAM, OQPSK
- OFDM, TDM
- OCDMA (Optical Code-Division Multiple-Access), OTDM (Optical Time Domain Multiplexing)
- Přístupové sítě - FTTx
- Pasivní optické sítě - BPON, GPON
- FSO (Free-space optical communication) - bezdrátový optický přenos např. vzduchem, vakuem, ad.
- Raman, SOA
- Spolupráce s Matlabem

OptiSystem dokáže spolupracovat s ostatními programy například s OptiGrating, kde se dá navrhnout správný kompenzační rozptyl složky v optických systémech. Dále umožňuje analýzu optických vláken, u kterých lze sledovat účinky PMD prvního a druhého řádu, sledování vlivu GVD (Group Velocity Dispersion) na šíření pulsu v optických vláknech v lineárním režimu nebo kombinované účinky GVD a SPM na Gaussově pulsním šíření. [6]

## 1.2 VPIphotonics

### 1.2.1 VPIlinkConfigurator

Tento program poskytuje jednoduché rozhraní pro analýzu výkonu s mapami zobrazující mnoho různých parametrů včetně optického výkonu, OSNR, disperze a nelineární úrovně zkreslení na XPM, SPM a FWM. Různé topologie sítí, jako jsou lineární vazby, hubbed-rings, rozvětvené sítě, prsten a mesh sítě, jsou nativně podporovány.

Editor topologie poskytuje pohodlné rozhraní pro vytváření a editaci požadavků topologie nebo přenos i ve složitých mesh sítích.

Program umožňuje propojení se software třetích stran, například běžné kancelářské aplikace a databáze, díky čemuž mohou být informace, jako topologie sítě, plány kanálu ad., získány z těchto aplikací. Podobně se mohou výsledky návrhů včetně konfigurací zařízení dodat do jiných programů[7].

### **1.2.2 VPI Fiber Optic**

Nástroj pro optimalizaci a návrh optických přístrojů na bázi optických vláken, jakou jsou dopovaná vlákna, Raman a parametrické zesilovače, spojitě vlny, impulzní zdroje z optických vláken a optické zpracování signálu pro telekomunikace[8].

### **1.2.3 VPI Photonic Circuits**

Program byl vyvinut pro přesné a rychlé zpracování moderních fotonických integrovaných obvodů příští generace ve stylu EDA designu.

Program je doplněn o rozsáhlé knihovny standardních pasivních fotonických a optoelektronických zařízení, elektrické a digitální logické prvky a mnoho přístrojových nástrojů pro zpracování signálů. V případě chybějícího zařízení lze přidat další pomocí Pythonu, MATLABu, C++ nebo rozhraní COM. Takovéto zařízení bude plně začleněno do simulace. Hierarchický přístup konstrukce umožňuje vytvořit složené zařízení z dílčích obvodů, které mohou být použity způsobem nativním. Podpora pokročilého skriptování umožňuje vytvořit složené zařízení s komplexní logikou uvnitř, které může provádět pokročilé optimalizace návrhu. Základní optimalizace parametrů, odhad výnosů a interaktivní ladění parametrů jsou vhodně podporovány na GUI úrovni[9].

### **1.2.4 VPI Optical System**

Program je určen pro tvorbu fotonických systémů a subsystémů pro krátký dosah a dálkové optické přenosové systémy. Program umožňuje přesné a efektivní modelování jakékoliv přenosové soustavy včetně obousměrného spojení, kruhové a mesh sítě, pomocí grafického rozhraní, sofistikovaný simulační plánovač a realistickou simulací modelů spolu s optickými signály zastoupené v různých stupních abstrakce. Prostředí umožňuje definovat požadavky na komponenty a hodnotí rizika s ohledem na detaily systému.

Program obsahuje více než 700 fotonických a elektronických modulů a k dispozici je také více než 500 šablon, které se nachází na fóru a pravidelně se aktualizují[10].

**Možnosti programu:**



- Porovnání odolnosti různých modulačních formátů (PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM, atd.)
- Návrh velkokapacitních WDM systémů založených na Raman
- Kvantifikace vláken vyvoláním degradačního signálu vyplývající z CD, Kerr, PMD, SRS, SBS a odrazy
- Přístupové sítě FTTx
- Pasivní optické sítě - BPON, G(E)PON, WDM-PON ad.
- Návrh analogové a digitální televize, rádio přes vlákno, mikrovlnné optické spojení
- Free-Space Optics (FSO) komunikační systémy
- Vyrovnání DMD - indukované zkreslení v multimodových systémech
- Volba schématu optického zesílení (EDFA, Raman, SOA, OPA) v CWDM a DWDM systémech
- Návrh interferometrického vláknového optického gyroskopu (iFoG)
- Definování požadavků pro analogové a digitální elektronická zařízení (TIA, RF amplifier, clock, ADC, DAC)
- Identifikace kritických konstrukčních parametrů - ztráty na cestě, RIN , filtrování ad.[10]

## 1.3 OptSim

OptSim je softwarový nástroj pro návrh a simulaci optických komunikačních systémů na úrovni šíření signálů od společnosti Synopsys. S nejmodernější simulační technikou, přehledným grafickým prostředím a laboratorními měřicími přístroji poskytuje OptSim vynikající přesnost a použitelnost. Software je komerčně dostupný od roku 1998[13].

### **Výhody programu:**

- Možnost vytvářet virtuální prototypy optických komunikačních systémů
- Optimalizace návrhu pro zvýšení výkonu a snížení nákladů
- Propojení s rozhraním třetích stran jako je MATLAB a Luna Optical Vector Analyzer
- Moderní elektrické modelování s vloženým SPICE motorem

### **Aplikace:**

- Koherentní optické komunikační systémy jako PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM
- Rozšířené modulační formáty jako D(Q)PSK, BPSK, m-PAM, m-QAM ad.
- DWDM, CWDM systém s optickým rozšířením například EDFA, Raman, SOA, OPA

- Analogové a digitální CATV, rádio přes vlákno a mikrovlnné fotonické spojení
- OCDMA, OTDM
- Elektronická disperzní kompenzace (EDC)
- Interferometrický vláknový optický gyroskop (iFoG)
- Optické propojení

#### **Rysy:**

- Podpora pro skenování více parametrů na bázi optimalizace
- MATLAB umožňuje snadno vytvořit vlastní uživatelské modely
- Rozhraní s laboratorními zařízeními jako jsou Agilent a Luna lze spojit simulaci s experimentem
- API pro programovací jazyky jako je C/C++ pro vytvoření vlastních uživatelských modelů
- Best Fit Laser nástroj, který umožňuje přizpůsobit parametry výkonných laserových modulů, aby se snadno získali požadované výkonnostní charakteristiky
- Rozsáhlá knihovna s předdefinovanými komponenty od výrobce [13]

## **1.4 Network Simulator 3**

Network Simulator 3 (NS-3) je síťový simulátor cílený především na výzkum a vzdělávací účely. Program je veřejně k dispozici licencovaný pod GNU GPLv2 licenci. Program je postaven na jádře, které je dobře zdokumentované, pro snadné používání a ladění, které obstarává potřeby simulace workflow od nastavení simulace po sledování informací a analýz. Softwarová infrastruktura NS-3 podporuje rozvoj simulačních modelů, které jsou dostatečně realistické. Každé tři měsíce je vydávána nová stabilní ověřená a zdokumentovaná verze obsahující nové modely. Nejnovější verze je NS-3.21.

Simulační jádro programu NS-3 podporuje výzkum sítí založených na IP protokolech a sítích bez IP protokolu. Dále nabízí bezdrátové simulace zahrnující modely pro Wi-Fi, WiMAX nebo LTE pro 1. a 2. vrstvu a různé statické nebo dynamické směrovací protokoly jako jsou OLSR a AODV. Dále podporuje real-time plánovač, který usnadňuje řadu simulací ve smyčkách používané pro interakci s reálnými systémy. Například se můžou vysílat a přijímat generované NS-3 pakety na skutečných zařízeních nebo může NS-3 sloužit jako propojení rámců s přidávanými odkazy efektů mezi virtuálními stroji[11].

NS-3 je C++ knihovna, která poskytuje sadu síťových simulačních modelů realizovaných jako C++ objekty zabalené do Pythonu. Uživatelé obvykle komunikují s touto knihovnou psaním C++ a Python aplikací, které konkretizují soubory simulačních modelů k vytvoření simulačního scénáře, vstupuje do simulace mainloop a

poté ukončí, když je simulace dokončena.

NS-3 knihovna je zabalena do pythonu pomocí pybindgen knihovnou, která deleguje parsování NS-3 C++ hlaviček do gccxml a pygccxml generuje automatické odpovídající C++ vazby. Tyto automaticky generované C++ soubory se nakonec sestavují do NS-3 python modulů umožňující uživatelům komunikovat s C++ NS-3 modelů a jádrem přes python skripty. [12]

## 1.5 OMNeT++

Jedná se o diskrétně událostní simulační prostředí pro nekomerční použití například pro akademické účely. Komerční program se nazývá OMNEST. Primárně se používá pro simulaci komunikačních sítí, ale vzhledem k jeho druhové a flexibilní architektuře se používá i v jiných oblastech jako jsou simulace komplexních IT systémů, v řadě sítí nebo v hardwarové architektuře. Komponenty a moduly jsou naprogramované v jazyce C++, které se sestavují do větších dílů a modelů pomocí jazyka NED. OMNeT++ nabízí IDE Eclipse, grafické pohybové prostředí a řadu dalších nástrojů. K dispozici jsou rozšíření pro simulace v reálném čase, emulace sítě, alternativní programovací jazyky (Java, C#), integrace databáze a další řadu funkcí. [14]

**Mezi hlavní simulační rámce pro OMNeT++ patří:**

### **INET Framework**

INET Framework lze považovat za standardní model knihovny protokolů pro OMNeT++. INET obsahuje modely pro internetové přenosy (IPv4, IPv6, TCP, UDP, OSPF, BGP, ad.), drátové a bezdrátové protokoly pro linkovou vrstvu (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, ad.), MANET protokoly, DiffServ, MPLS s LDP, RSVP-TE signalizaci, několik aplikačních modelů a mnoho dalších protokolů a komponent. INET je udržován týmem OMNeT++ s využitím patchů a nových modelů s přispěním členů komunity.

### **INETMANET**

INETMANET je součástí INET Framework. Udržuje si aktuálnost s INET a přidává řadu experimentálních funkcí a protokolů, zejména pro mobilní sítě ad-hoc.

### **MiXiM**

Jedná se o modelový framework mobilní a pevné bezdrátové sítě (bezdrátové senzorové sítě, ad-hoc sítě, dopravní sítě, ad.). MiXiM se zaměřuje na nižší vrstvy síťového modelu a nabízí detailní modely šíření rádiových vln, odhad interference, odhad spotřeby energie rádiových vysílačů a bezdrátové MAC protokoly. MiXiM vznikl sloučením několika dřívějších OMNeT++ frameworků (ChSim, Mac Simulator, Mobility Framework, Telecommunication Networks Group, Positif Framework), vytvořených různými univerzitami. Plánuje se sloučení MiXiM do INET Framework.

## **Castalia**

Castalia je simulátor pro bezdrátové senzorové sítě (WSN), Body Area Network (BAN) a obecné sítě s nízkým výkonem vložených zařízení. Mezi charakteristické vlastnosti Castalia patří: model pro časové změny ztrát na cestě, interference jemným zrnem a výpočet RSSI, modelování fyzikálních procesů a implementace několika protokolů MAC. Castalia umožňuje spustit velké parametrické simulační studie, zpracovat a zobrazit výsledky. Castalia je vyvíjena společností NICTA od roku 2007.[15]

### **Komponenty OMNeT++**

- Knihovna simulačního jádra
- Popis topologie jazyka NED
- OMNeT ++ IDE založený na platformě Eclipse
- Příkazový řádek uživatelského rozhraní pro provedení simulace (Cmdenv)
- Nástroje
- dokumentace, ukázkové simulace, ad.

OMNeT++ je podporován na systémech Windows, Linux, Mac OS X a dalších Unix systémech. OMNeT++ IDE je podporován na Windows, Linus, Mac OS X[14].

## 2 KÓDOVÁNÍ NRZ A OKO ROZHODNUTÍ

Ve všech programech byla provedena simulace přenosu kódování NRZ pro 1 Gbit/s a 10 Gbit/s a na základě těchto simulací a jejich výsledků bylo provedeno porovnání programů. V simulaci se sledovaly změny oka rozhodnutí v určitých vzdálenostech, kdy došlo k překročení bitové chybovosti BER  $1 \cdot 10^{-9}$ .

Kódování NRZ - jedná se o kódování, které nabývá dvou hodnot (logická 1 a 0), jenž jsou definovány určitou význačnou hodnotou.

### Varianty NRZ:

- Unipolární NRZ - logická 1 je reprezentována například určitou kladnou hodnotou napětí a logická 0 taktéž, ale s menší hodnotou napětí.
- Bipolární NRZ - Logická 1 a 0 jsou reprezentovány opačnými hodnotami napětí
- NRZ Mark - logická 1 je reprezentována změnou a logická 0 pokud změna nenastává. K přechodu dochází na sestupné hraně pro daný bit.
- NRZ Space - logická 0 je reprezentována změnou a logická 1 pokud změna nenastává. K přechodu dochází na sestupné hraně pro daný bit.
- Invertované NRZ - logická 1 je reprezentována změnou a logická 0 pokud změna nenastává. K přechodu dochází na vzestupné hraně pro daný bit.[16]

## 2.1 Oko rozhodnutí

Oko rozhodnutí neboli diagram oka se používá pro kvalitativní analýzu signálu používaného v digitálních přenosech, kdy je pro obnovu signálu klíčové rozhodovací místo s definovanými rozhodovacími okamžiky a úrovněmi. S okem rozhodnutí souvisí pojmy bitová chybovost BER, Q-Faktor a odstup signálu od šumu SNR. [17][18]

Na Obr. 2.1 je zobrazeno oko rozhodnutí s rozhodovacím okamžikem. Střed oka je tvořen rozhodovací úrovní a polovina výšky slouží jako rezerva pro správná určení signálového prvku.[17]

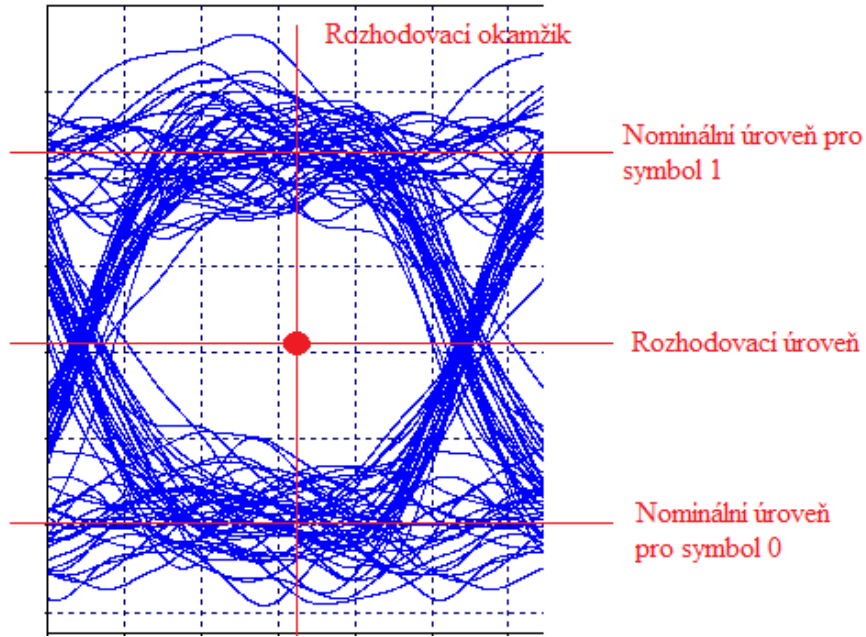
### 2.1.1 Q-faktor

Q-faktor se používá pro vyhodnocování kvality přenosu. Jeho definice vychází ze statistických parametrů optického signálu. Vztah pro výpočet Q-faktoru:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} [-] \quad (2.1)$$

kde:

- $\mu_1$  - střední hodnota úrovně logické jedničky
- $\mu_0$  - střední hodnota úrovně logické nuly
- $\sigma_1$  - rozptyl hodnot úrovně logická jedna



Obr. 2.1: Oko rozhodnutí [17]

- $\sigma_0$  - rozptyl hodnot úrovně logická nula [17]

Z Q-faktoru lze určit i hodnotu odstup optického signálu od šumu  $OSNR = 20 \log Q$ . [17] Souvislost Q-faktoru v oku rozhodnutí je znázorněna na Obr. 2.2.

### 2.1.2 Bitová chybovost kanálu (BER)

Pokud je rušení přes rozhodovací úroveň, dojde k chybnému vyhodnocení a vzniku chyby. Četnost chyb popisuje bitová chybovost kanálu (BER). BER se dá vypočítat jednoduchou metodou, pokud je počet chyb známý, lze použít tento vztah:

$$BER = \frac{N_E}{N_A} [-] \quad (2.2)$$

kde:  $N_E$  je počet chybných bitů  $N_A$  je počet všech bitů [18]

Bitovou chybovost kanálu lze určit i pomocí Q-faktoru a to vztahem: [18]

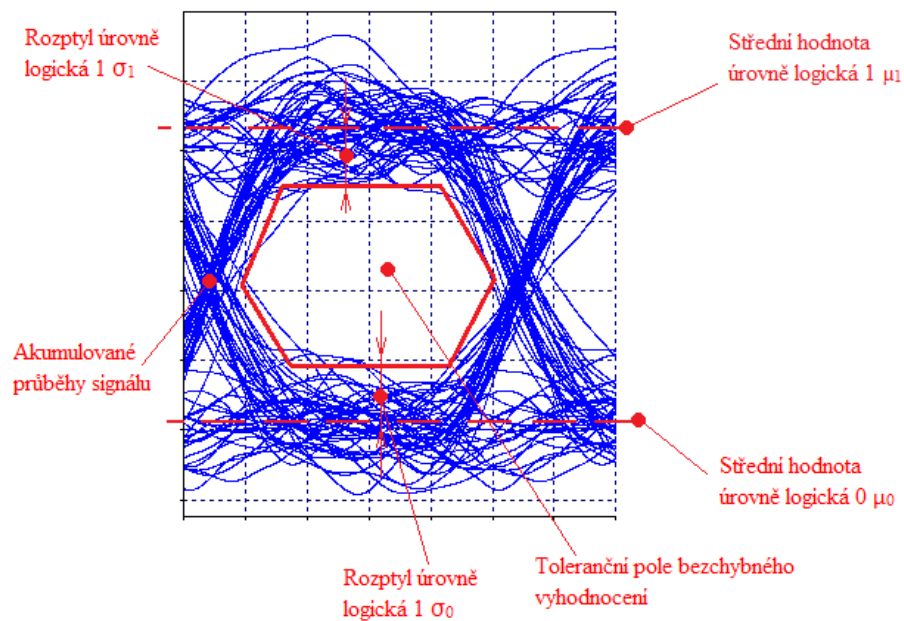
$$BER = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \sqrt{\frac{SNR}{\sqrt{2}}} [-] \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Odstup signálu od šumu (SNR)

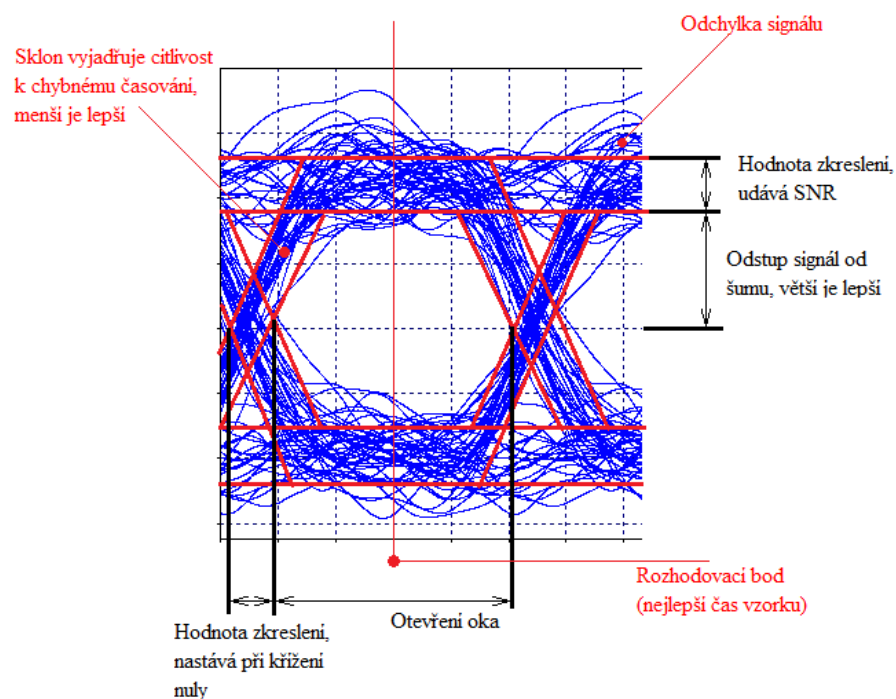
Bitová chybovost kanálu je ovlivněna odstupem signálu od šumu, jenž dokazuje následující vzorec:

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} [-] \quad (2.4)$$

Na Obr.2.3 je znázorněn vliv SNR v oku rozhodnutí.[18]



Obr. 2.2: Souvislost Q-faktoru v oku rozhodnutí [18]

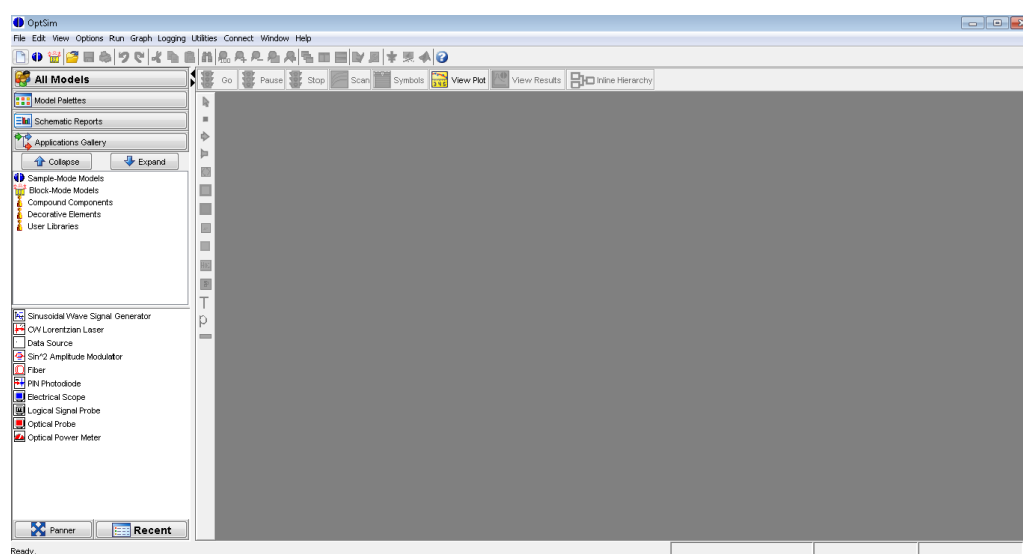


Obr. 2.3: Souvislost SNR v oku rozhodnutí [18]

## 3 PROSTŘEDÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

### 3.1 OptSim - Prostředí simulačního programu

OptSim používá grafické rozhraní, které je pro uživatele přívětivější a lehčí na obsluhu. V horní liště se nachází standardní menu panel s rychlými volbami např. vytvoření nového schématu, otevření nebo uložení projektu ad. Nalevo se nachází sloupec, který je rozdělen na dvě části. V první polovině se vybírají komponenty pro projekt a v dolní části se ukládají naposledy použité komponenty. Nejvíce prostoru zabírá pracovní plocha, která je po zapnutí zašedlá.



Obr. 3.1: Prostředí simulačního programu OptSim

#### 3.1.1 OptSim - Vytvoření projektu

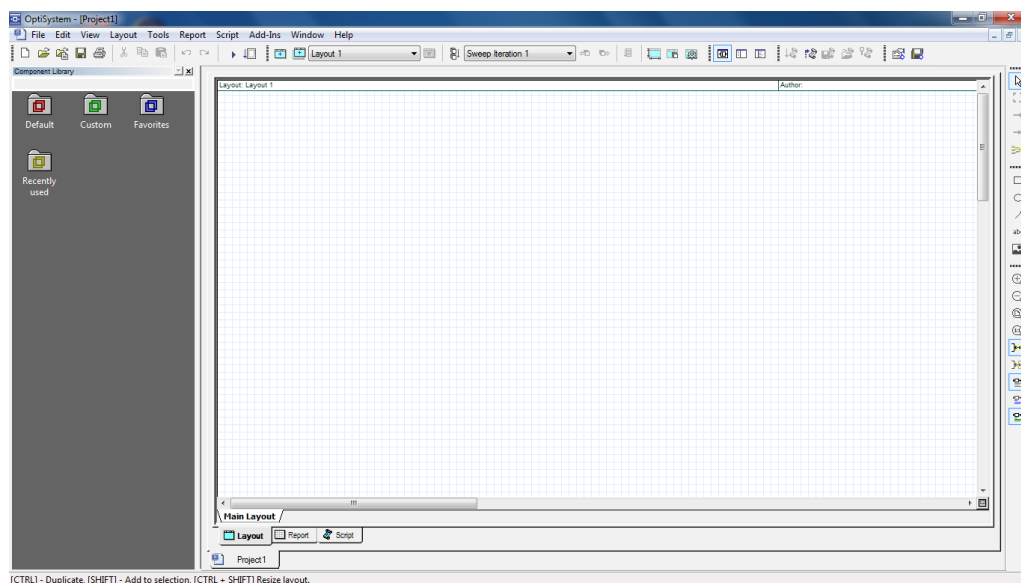
Projekt se vytváří standardně pomocí nabídky File, v horní menu liště, a následně volbu New Schematic. Následně se objeví nové okno, na kterém se nastavuje druh dokumentu a typ simulace a také cesta pro ukládání simulace a výsledků. Po potvrzení se zobrazí nabídka, na které se nastavují parametry simulace, například doba trvání simulace, možnost vytvoření konstant, ad. Po dokončení se aktivují nástroje pro simulaci a bílá pracovní plocha, na kterou se přetažením přidávají funkční bloky, u kterých je možné upravit parametry jako jsou například vlnová délka, bitová rychlost ad., a propojením bloků mezi sebou se vytváří požadovaná simulační struktura. Po spuštění simulace proběhne kontrola, zda je vše nastaveno a poté proběhne simulace jejíž výsledky se uloží do počítače v místě uloženého projektu. Výsledky se dají



prohlédnout pravým kliknutím na daný měřicí přístroj a výběrem jedné z možných položek.

## 3.2 OptiSystem - Prostředí simulačního programu

Prostředí dominuje velká pracovní plocha, na kterou se umísťují komponenty. Nahoře se nachází lišta menu se základními funkcemi. Pod ní je lišta s rychlými volbami jako uložení nebo otevření projektu, nastavení velikosti pracovní plochy ad. V levé části nalezneme knihovnu s komponenty. V ní se nachází čtyři složky. Složka default obsahuje definované komponenty vydavatelem. Ve zbylých se nachází nejčastěji používané nebo naposledy použité komponenty. Po vybrání daného komponentu se přetáhnutím převede na pracovní plochu. Uživatel si poté může upravit vlastnosti komponent například frekvenci, útlum, fázi, frekvenční pásmo ad. V pravé části se nachází nástroje pro pracovní plochu jako je lupa, vložení textu, přidání vstupních a výstupních portů, ad.



Obr. 3.2: Prostředí simulačního programu OptiSystem

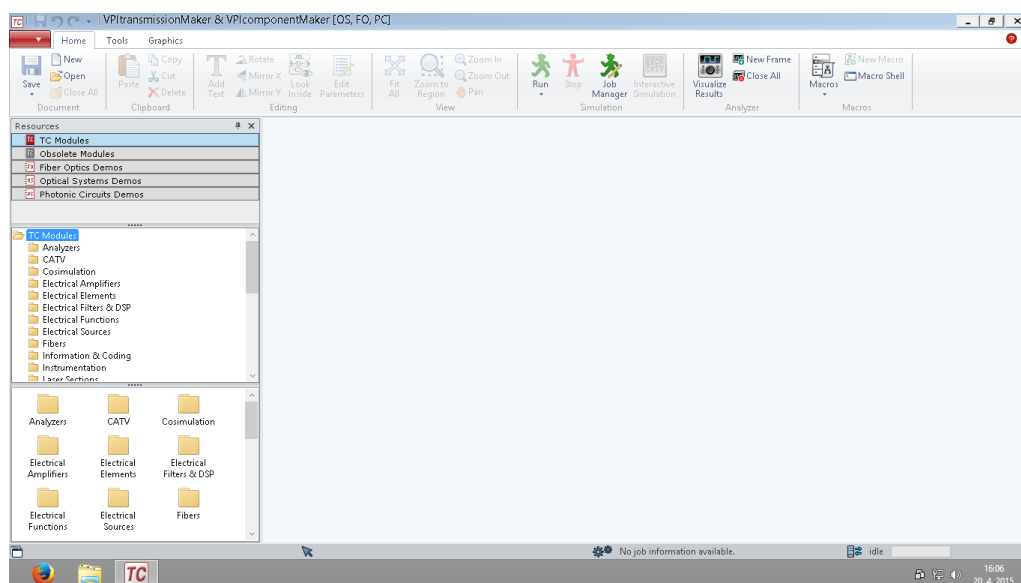
### 3.2.1 OptiSystem - Vytvoření projektu

Projekt se vytváří pomocí nabídky File a následně volbou New nebo kliknutím na ikonu prázdného bílého listu v horní liště. Po stisku se objeví bílá čtverečková pracovní plocha a povolí se nástroje na horní a pravé liště. Poté se pomocí přetáhnutí komponent ze sloupce na levé straně vytváří požadované schéma. Pokud se dávají komponenty postupně ve správném pořadí, tak automaticky program propojí jejich

vstupy a výstupy. Po sestavení zapojení se simulace spustí pomocí volby File - Calculate nebo tlačítkem Play v horní liště. V novém okně se stiskne tlačítko play a pokud program nezjistí chybu, proběhne simulace. Po úspěšné simulaci je možné si výsledky prohlédnout dvojklikem na daný měřicí přístroj a objeví se okno s výsledky.

### 3.3 VPI - Prostředí simulačního programu

Program používá jednoduché a přehledné grafické prostředí. V horní části se nachází funkční tlačítka pro vytvoření, uložení nebo spuštění projektu ad. Na levém boku se nachází seznam s komponenty pro zapojení, který je rozdělen do složek a dole se potom zobrazí komponenty nacházející se v dané složce. Nejvíce prostoru zaujímá bílá pracovní plocha, na které se sestavuje zapojení. Dolní lišta slouží jako informační, na které se zobrazuje, zda probíhá simulace.



Obr. 3.3: Prostředí simulačního programu VPI

#### 3.3.1 VPI - Vytvoření projektu

Nový projekt se vytváří volbou New (prázdný list) v horní liště. Po zmáčknutí se objeví zašedlá čtverečková plocha a povolí se funkční tlačítka (např. uložení, spuštění simulace, ad.). Zapojení se vytváří vložením komponenty ze seznamu z levé strany. Komponenty se poté musí propojit mezi sebou pomocí kliknutí na výstup komponentu a přetažením na vstup dalšího. Po sestavení zapojení se projekt spustí pomocí tlačítka Run (zelený panáček). Program zkontroluje, zda je vše zapojené

a zda hodnoty odpovídají limitům a pokud nenalezne žádný problém, proběhne simulace. Po skončení simulace se zobrazí nové okno, kde se nachází výsledky.

## 4 VÝSLEDKY SIMULACÍ V PROGRAMECH

### 4.1 Nastavení parametrů

Jako výchozí nastavení jsem použil nastavení z programu OptSim. U modulu pro vysílací laser nastavil jako referenční kmitočet 193,4 THz a výkon jsem nastavoval na takovou hodnotu, aby úroveň výkonu na vstupu vlákna odpovídala hodnotě -2,3 dBm pro 1 Gbit/s a -3,02 dBm pro 10 Gbit/s. Optické vlákno mělo nastaveno hodnotu útlumu na 0,25 dB/km, referenční kmitočet taktéž na 193,4 THz. Hodnoty disperzí jsem ponechal původní, které jsou zde nastaveny například hodnota disperze na referenčním kmitočtu byla 16 ps/nm/km, Non-linearity koeficient 1,266 a Non-linear refractive index na  $2,5 \cdot 10^{-20}$ . Na Photodiode resp. na Sensitivity optical receiver byla hodnota Responsivity nastavena na 1 A/W. Tyto hodnoty byly nastaveny u všech programů stejně, pokud se u některého z programů dalo nastavit i jiné parametry než u OptSimu, tak buď byly ponechány ve výchozím stavu nebo byly vypnuty.

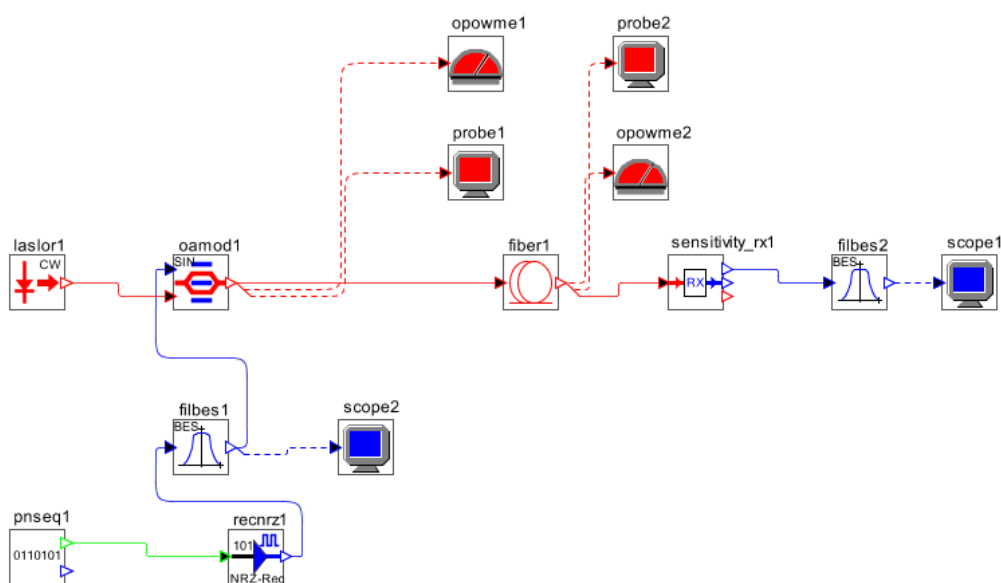
### 4.2 Program OptSim

#### 4.2.1 OptSim - Schéma zapojení

Na Obr. 4.1 je znázorněno zapojení pro přenos NRZ kódování. Zapojení je složeno z těchto bloků:

- Data source - nastavena bitová rychlost na 10 Gbit/s a 1 Gbit/s
- Driver NRZ - převádí data na elektrické signály
- Lorentzian laser - výkon pro 1 Gbit/s nastaven na 0,67 dBm a pro 10 Gbit/s na -0,2 dBm
- Amplitude modulator sin2 - převádí elektrický signál na optický
- Optic fiber - přenosové médium
- Sensitivity optical receiver - převádí optický signál na elektrický, použit nefiltrovaný elektrický výstup
- Bessel filter - dolní propust 10 GHz a 1 GHz
- Electrical scope - slouží pro zobrazení oka rozhodnutí
- Optical scope - slouží pro zobrazení optického spektra
- Optical power meter - ukazuje výkon optického paprsku

Sensitivity optical receiver byl použit místo Photodiode, jenž je použit u ostatních programů, z důvodu nefunkčnosti pro systém s přenosem bitové rychlosti 1 Gbit/s.

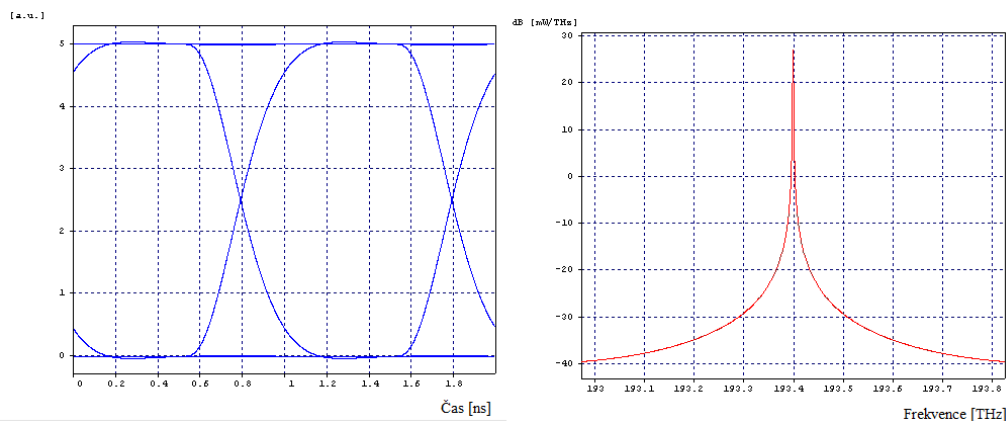


Obr. 4.1: Schéma zapojení pro NRZ v OptSim

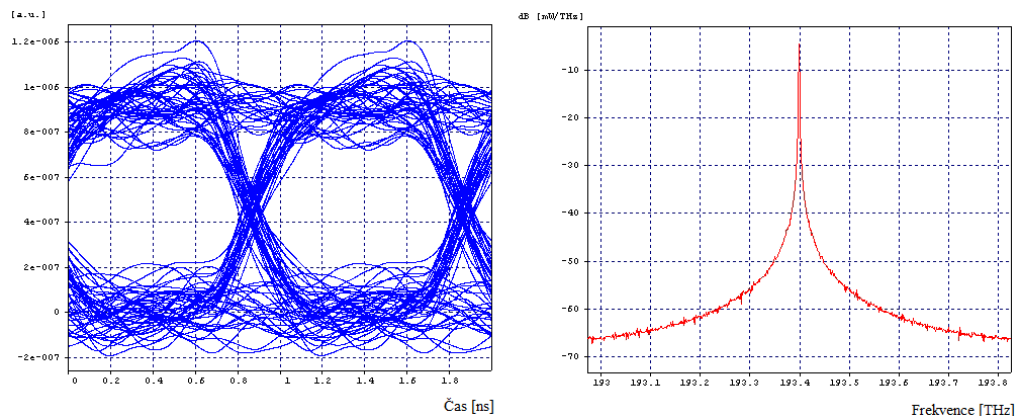
#### 4.2.2 OptSim - Výsledky simulace přenosu NRZ kódování pro 1 Gbit/s

Na Obr.4.2 jsou znázorněny výstupní grafy u vysílače. Jedná se o oko rozhodnutí s chybovostí BER  $1 \cdot 10^{-40}$ , které je úplně otevřené a bez šumu, a na druhém je zobrazeno optické spektrum s úrovní optického výkonu na vstupu kanálu  $-2,311$  dBm.

Na Obr.4.3 je zobrazeno oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 124 km, kdy došlo k přiblížení hraniční chybovosti na  $1,99 \cdot 10^{-9}$  a hodnota Q-factor byla 5,89 při úrovni optického výkonu na výstupu kanálu  $-33,21$  dBm.



Obr. 4.2: Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 1 Gbit/s



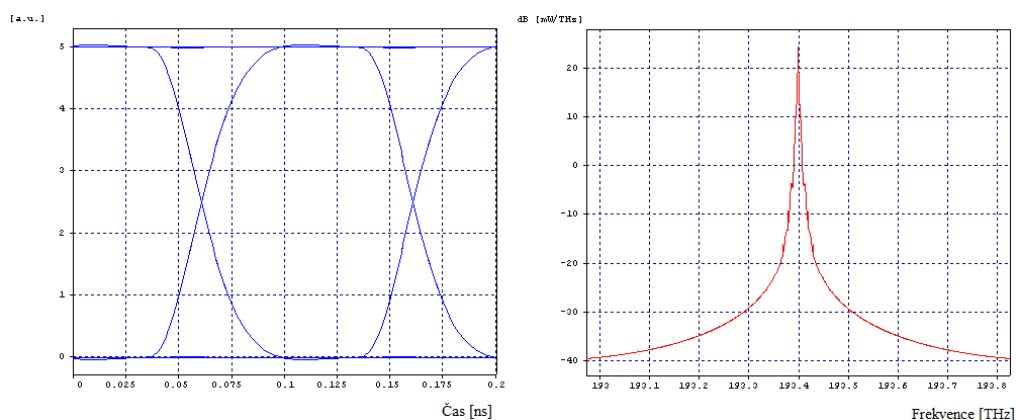
Obr. 4.3: Oko rozhodnutí a optické spektrum za filtrem ve vzdálenosti 124 km pro 1 Gbit/s

Z grafů je patrné, že sklon vyjadřující citlivost k chybnému časování je na vstupu a výstupu přenosu podobné. Na výstupním grafu je možné pozorovat, že toleranční pole bezchybného vyhodnocování je dostatečně velké a zkreslení pro určení logických úrovní a odstup signálu od šumu jsou přijatelné.

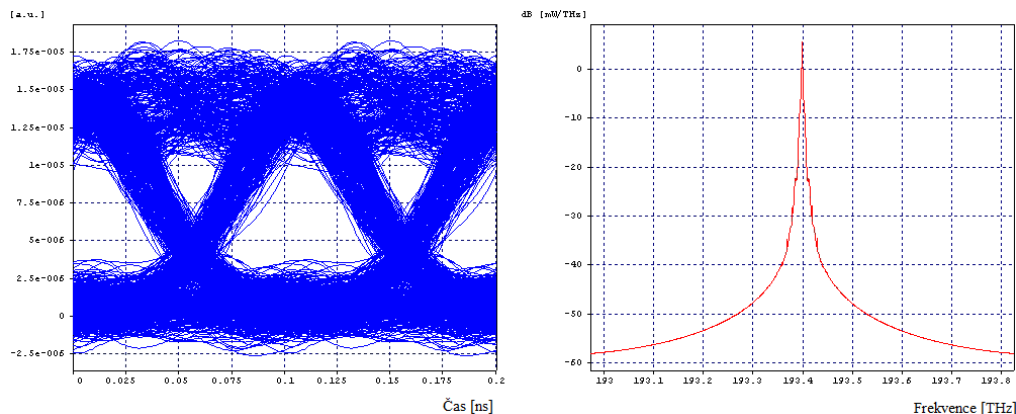
### 4.2.3 OptSim - Výsledky simulace přenosu NRZ kódování pro 10 Gbit/s

Na Obr.4.4 jsou znázorněny výstupní grafy u vysílače. Jedná se o oko rozhodnutí s chybovostí  $BER\ 1.10^{-40}$ , které je úplně otevřené a bez šumu, a na druhém je zobrazeno optické spektrum s úrovní optického výkonu na vstupu kanálu  $-3,029\text{ dBm}$ .

Na Obr.4.5 je zobrazeno oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 75 km, kdy došlo k přiblížení hraniční chybovosti na  $1,39.10^{-9}$  a hodnota Q-factoru byla 6,097 při úrovni optického výkonu na výstupu kanálu  $-21,78\text{ dBm}$ .



Obr. 4.4: Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 10 Gbit/s



Obr. 4.5: Oko rozhodnutí a optické spektrum za filtrem ve vzdálenosti 75 km pro 10 Gbit/s

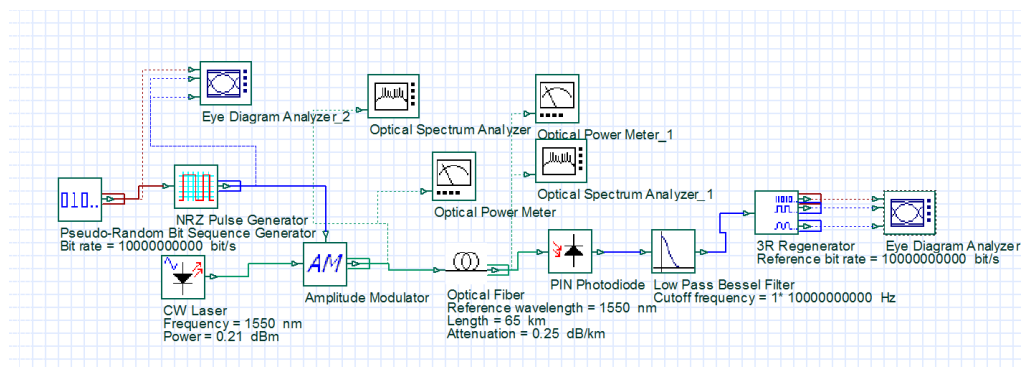
Z grafů je možné pozorovat značné zašumění v oblasti pro určování logických úrovní na výstupu. Toleranční pole bezchybného vyhodnocování je proti systému s přenosovou rychlostí 1 Gbit/s menší, ale za to má větší odstup signálu od šumu.

## 4.3 Program OptiSystem

### 4.3.1 OptiSystem - Schéma zapojení

Na Obr.4.6 je zobrazeno zapojení NRZ v tomto programu. Zapojení je tvořeno bloky:

- Pseudo-Random Bit Sequence Generator - nastavena bitová rychlost na 10 Gbit/s a 1 Gbit/s
- NRZ pulse generator - vytváří kódování typu NRZ
- CW laser - výkon pro 1 Gbit/s nastaven na 4 dBm a pro 10 Gbit/s na 0,21 dBm
- Amplitude modulator - převádí elektrický signál na optický
- Optical fiber - přenosové médium
- Pin Photodiode - převádí optický signál na elektrický
- Lowpass Bessel Filter - dolní propust 10 GHz a 1 GHz
- 3R Regenerator - obnovuje data s referenční bitovou rychlostí 10 Gbit/s a 1 Gbit/s
- Eye Diagram Analyzer - slouží pro zobrazení oka rozhodnutí s dalšími potřebnými hodnotami např. minimální chybovost BER
- Optical Spectrum Analyzer - slouží pro zobrazení optického spektra
- Optical Power meter - slouží pro zobrazení optických výkonů

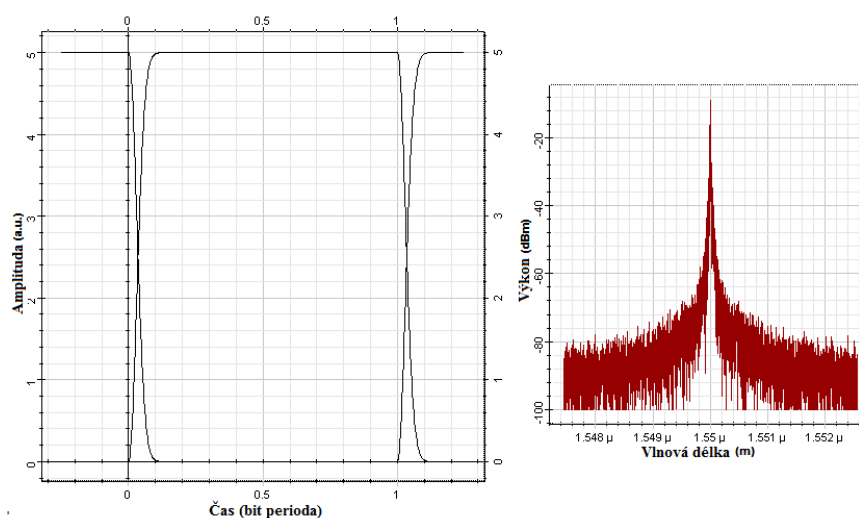


Obr. 4.6: Schéma zapojení pro NRZ v Optisystem

### 4.3.2 Optisystem - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 1 Gbit/s

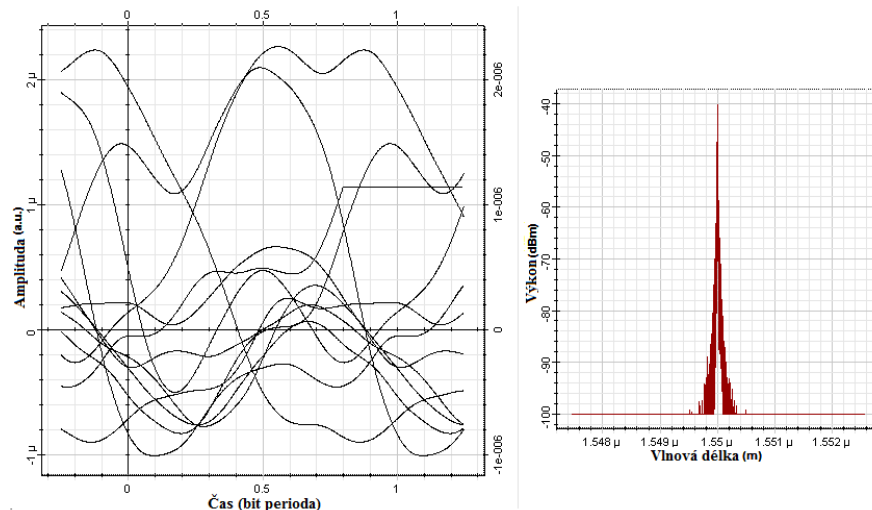
Na prvním obrázku je znázorněný výstupní graf optického spektra s úrovní optického výkonu za Optical trasnmmitter s hodnotou  $-2,301$  dBm a oko rozhodnutí s chybovostí BER 0.

Na Obr.4.8 je znázorněno oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 125 km. Přestože podle grafu nelze jednoznačně určit logické úrovně, tak chybovost BER měla hodnotu  $3,26 \cdot 10^{-9}$ , která je přijatelná. Hodnota úroveň optického výkonu na výstupu kanálu byla  $-33,55$  dBm a hodnota Q-factoru byla 5,77.



Obr. 4.7: Optické spektrum za Amplitude modulator pro 10 Gbit/s



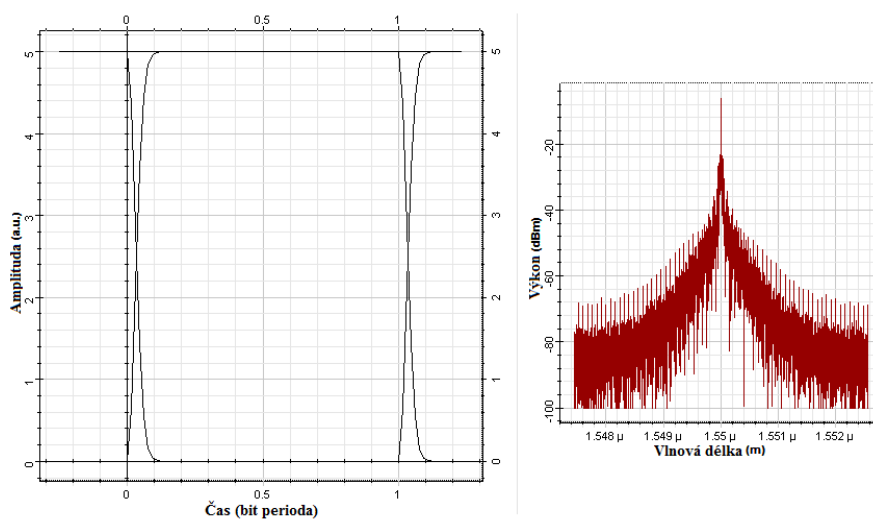


Obr. 4.8: Oko rozhodnutí a optické spektrum za 3R Regenerátorem ve vzdálenosti 125 km pro 1 Gbit/s

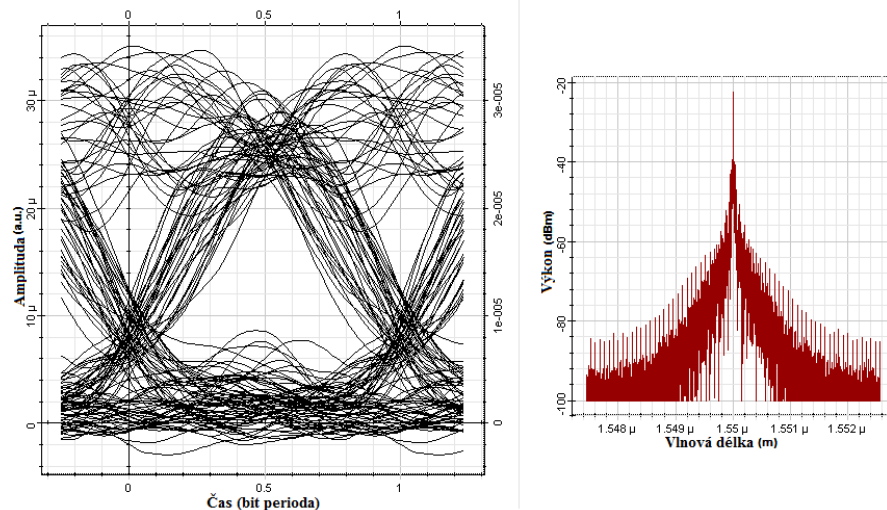
### 4.3.3 Optisystem - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 10 Gbit/s

Na prvním obrázku je znázorněný výstupní graf optického spektra s úrovní optického výkonu za Optical trasnmitter s hodnotou  $-3,009$  dBm a oko rozhodnutí s chybovostí BER 0.

Ve vzdálenosti 65 km byla chybovost BER  $2,32 \cdot 10^{-9}$ . Na Obr.4.10 je zobrazeno oko rozhodnutí a optické spektrum s úrovní optického výkonu na výstupu kanálu  $-19,26$  dBm a hodnota Q-factoru byla 5,86 v této vzdálenosti.



Obr. 4.9: Oko rozhodnutí a optické spektrum za Amplitude modulator pro 10 Gbit/s



Obr. 4.10: Oko rozhodnutí a optické spektrum za 3R Regenerátorem ve vzdálenosti 65 km pro 10 Gbit/s

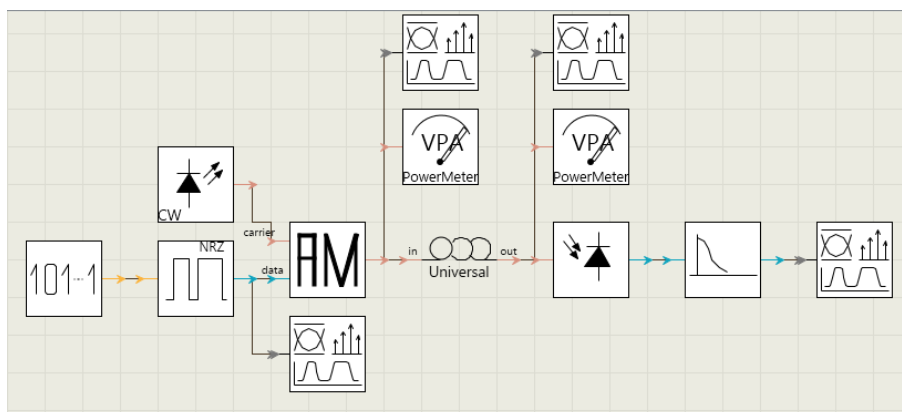
Na Obr.4.10 lze vypožorovat, že sklon vyjadřující citlivost k bezchybnému časování je oproti vstupnímu průběhu více skloněný. Toleranční pole bezchybného vyhodnocení se taktéž zmenšila, na proti tomu se zvýšil poměr odstupů signálu od šumu. V úrovních pro určení logických úrovní došlo k mírnému zkreslení.

## 4.4 Program VPI

### 4.4.1 VPI - Schéma zapojení

Na obr.4.11 je znázorněné schéma zapojení NRZ. Zapojení je tvořeno bloky:

- PRBS - nastavena bitová rychlost na 10 Gbit/s a 1 Gbit/s
- NRZ Coder - vytváří kódování typu NRZ
- CW laser - výkon pro 1 Gbit/s nastaven na 1,16 mW a pro 10 Gbit/s na 1,065 mW
- AM modulator - převádí elektrický signál na optický
- Universal fiber - přenosové médium
- Photodiode - převádí optický signál na elektrický
- FilterEL - dolní propust 10 GHz a 1 GHz
- Signal Analyzer - slouží pro zobrazení oka rozhodnutí nebo optického spektra
- Power meter - slouží pro zobrazení optických výkonů



Obr. 4.11: Schéma zapojení pro NRZ ve VPI

#### 4.4.2 VPI - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 1 Gbit/s

Na Obr.4.12 je znázorněné oko rozhodnutí za NRZ kóděrem s chybovostí BER 0 a graf optického spektra s úrovní optického výkonu na vstupu kanálu  $-2,31$  dBm za AM modulátorem.

Na Obr.4.13 je zobrazeno oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 100 km s chybovostí BER  $5,33 \cdot 10^{-9}$  a úrovní optického výkonu na výstupu kanálu  $-27,31$  dBm a hodnota Q-factoru byla 5,72.

Z grafů je možné sledovat změnu sklonu vyjadřující citlivost k bezchybnému časování, kdy na výstupu je sklon větší. Na výstupním grafu je viditelné velké toleranční pole bezchybného vyhodnocení a menšímu zkreslení signálu v místě pro určení logických úrovní.

#### 4.4.3 VPI - Výsledky simulace přenosu kódování NRZ pro 10 Gbit/s

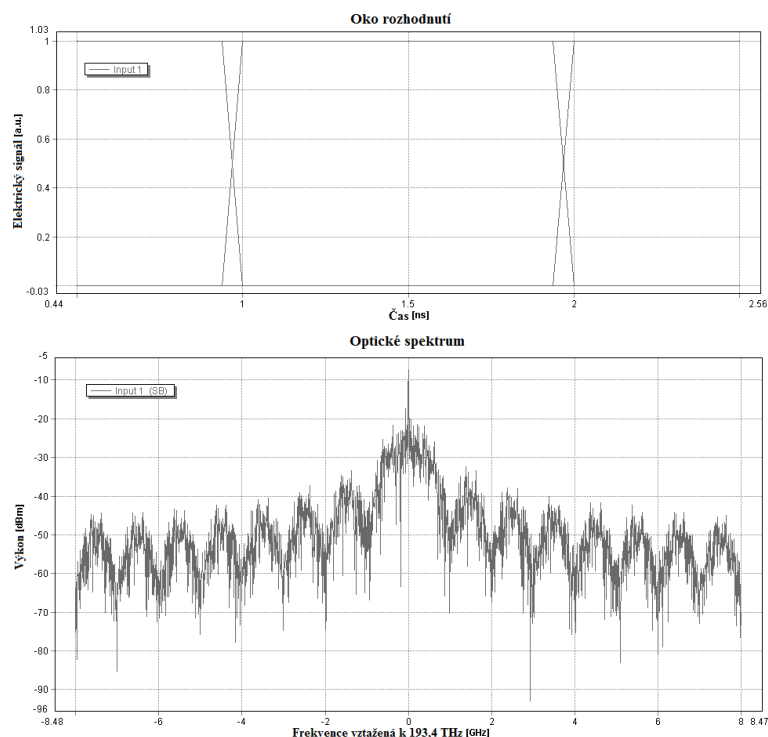
Na Obr.4.14 je znázorněné oko rozhodnutí za NRZ kóděrem s chybovostí BER 0 a graf optického spektra s úrovní optického výkonu na vstupu kanálu  $-3,017$  dBm za AM modulátorem.

Na Obr.4.15 je zobrazeno oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 67 km s chybovostí BER  $5,37 \cdot 10^{-9}$  a úrovní optického výkonu na výstupu kanálu  $-19,78$  dBm a hodnota Q-factoru byla 5,72.

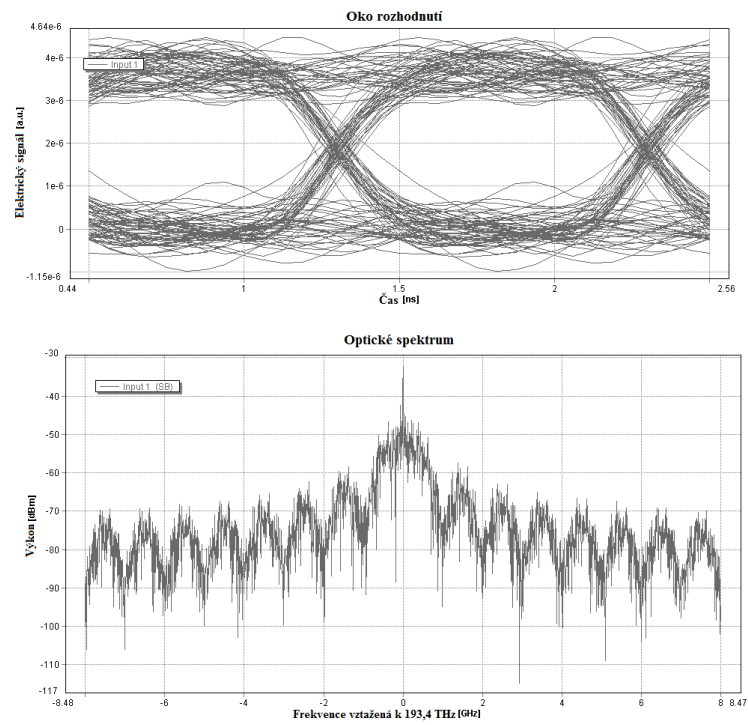
Z výstupního grafu lze vidět zvýšení sklonu vyjadřující citlivost k bezchybnému časování oproti vstupnímu grafu, dále došlo ke zmenšení tolerančního pole bezchybného vyhodnocení, k zvýšení odstupu signálu od šumu a menšímu zkreslení signálu v místě pro určení logických úrovní.

## 4.5 Ověření funkčnosti disperzí

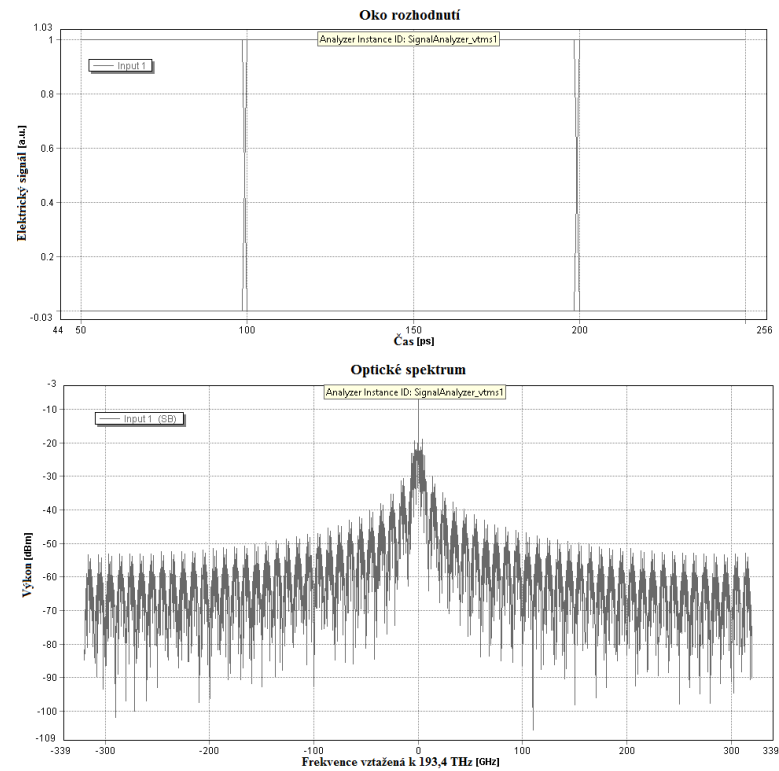
V programech bylo otestováno, zda při simulaci počítají s disperzemi. Toto ověření bylo provedeno záměnou optického vlákna za útlumový článek s odpovídajícím útlumem vypočítaným z útlumu vlákna 0,25 dB/km a délkou vlákna u přenosu pro rychlost 10 Gbit/s. V programu OptSim byla nastavena hodnota útlumového članku na 18,75 dB. Při tomto nastavení došlo k poklesu bitové chybovosti BER na  $3,48 \cdot 10^{-17}$  a zvýšení Q-factoru na 8,35. V programu OptiSystem byla nastavena hodnota útlumového članku na 16,25 dB. Při tomto nastavení došlo k poklesu bitové chybovosti BER na  $7,45 \cdot 10^{-18}$  a zvýšení Q-factoru na 8,53. V programu VPI byla nastavena hodnota útlumového članku na 16,75 dB. Při tomto nastavení došlo k poklesu bitové chybovosti BER na  $2,69 \cdot 10^{-28}$  a zvýšení Q-factoru na 12,89.



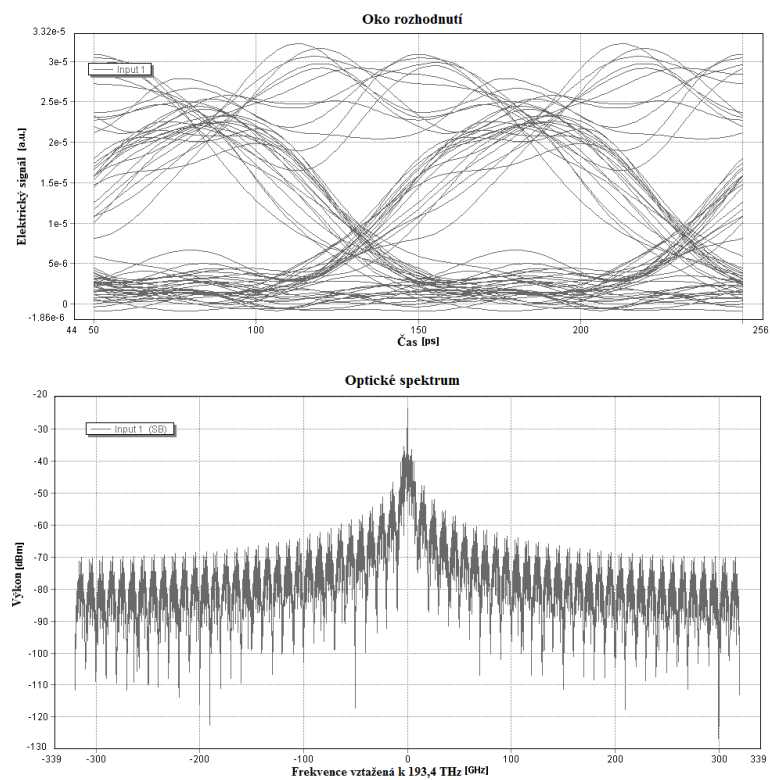
Obr. 4.12: Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 1 Gbit/s



Obr. 4.13: Oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 100 km pro 1 Gbit/s



Obr. 4.14: Oko rozhodnutí a optické spektrum na vstupu pro 10 Gbit/s



Obr. 4.15: Oko rozhodnutí a optické spektrum ve vzdálenosti 67 km pro 10 Gbit/s

## 5 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

Tab. 5.1: Tabulka naměřených hodnot pro přenos 1 Gbit/s

	Výkon na vstupu	Vzdálenost	Výkon na výstupu	BER	Q-factor
OptSim	-2,311 dBm	124 km	-33,21 dBm	$1,99 \cdot 10^{-9}$	5,89
OptiSystem	-2,301 dBm	125 km	-33,55 dBm	$3,26 \cdot 10^{-9}$	5,77
VPI	-2,310 dBm	100 km	-27,31 dBm	$5,33 \cdot 10^{-9}$	5,72

Tab. 5.2: Tabulka naměřených hodnot pro přenos 10 Gbit/s

	Výkon na vstupu	Vzdálenost	Výkon na výstupu	BER	Q-factor
OptSim	-3,029 dBm	75 km	-21,78 dBm	$1,39 \cdot 10^{-9}$	6,097
OptiSystem	-3,009 dBm	65 km	-19,26 dBm	$2,32 \cdot 10^{-9}$	5,86
VPI	-3,017 dBm	67 km	-19,78 dBm	$5,37 \cdot 10^{-9}$	5,72

Pro přenos s rychlostí 1 Gbit/s mají programy OptSim a OptiSystem podobné výsledky, jak je patrné z tabulky 5.1. V programu VPI má stejné zapojení se stejnými parametry dosah systému kratší o 25 km. Může to být způsobeno algoritmem výpočtu simulace, jenž má každý program jiný. Pro přenos s rychlostí 10 Gbit/s podaly programy podobné výsledky. V případě programů VPI a OptiSystem jsou výsledky skoro srovnatelné a rozdíl mezi nimi činí 2 km. Program OptSim má pro přenos na této rychlosti dosah až 75 km.

Programy OptSim, OptiSystem a program od VPI jsou určeny pro komerční použití a jsou tedy i placené. Používají grafické prostředí, u nichž má uživatel přehled o tom, kde má jaké moduly, jak jsou mezi sebou propojeny a může si u nich nastavit určité parametry, které daný modul podporuje. Dále mají k dispozici široký výběr různých modulů potřebné pro vytvoření požadovaného prostředí. U OptSimu jsem měl problémy s orientací v knihovně s moduly, jelikož jsou zde jen zobrazeny pomocí ikon a jejich název se objeví až po najetí kurzorem, zatím co OptiSystem a VPI mají tyto moduly rozděleny do složek a jsou zde u nich popisky. V případě OptSimu jde si tuhle knihovnu upravit a nastavit si jaké moduly se budou zobrazovat.

V programu OptiSystem jsem postrádal možnost si vyzkoušet nějaké ukázkové simulace, které se u programu nenachází. Tenhle neduh se dá ale vyřešit díky stránkám výrobce, kde se nachází případná zajímavá zapojení, u kterých je popis a výsledky simulace. Také se dá využít fóra, u kterého není potřeba mít registraci a je

zde možnost se poradit s ostatními uživateli a případně si přes fórum přeposílat zapojení.

OptSim nabízí propracované dokumenty k programu, ve kterých lze nalézt popis programu a jeho funkce. V dalších dokumentech se nachází popis modulů pro dva režimy programu. V těchto dokumentech jsou i popsány ukázkové simulace, jenž obsahuje program. Bohužel je zde absence fóra na stránkách, a tak je potřeba případné problémy vyhledat na jiných fórech.

Program od společnosti VPI taktéž obsahuje ukázkové simulace a dokumentaci k programu. Po rozklepnutí daného modulu se po zobrazení okna pro nastavování parametrů nachází tlačítko s nápovědou, kde se dá nalézt vše o daném modulu (k čemu slouží a jaké parametry se dají na něm nastavit). Je zde možnost využít fóra na oficiálních stránkách, ale pouze po registraci a přihlášení.

Podle mého názoru se v programu OptiSystem a VPI dá nastavit více parametrů na modulech než u programu OptSim. V OptSim je možnost si nastavit v rámci projektu různé konstanty, které je možné upravovat před zapnutím simulace a usnadňuje tak případnou práci při přepisování parametru na modulech. Tuhle možnost jsem v programech OptiSystem a VPI nenašel. OptiSystem na rozdíl od zbylých placených programů nabízí 30 denní zkušební licenci pro studijní a výzkumné účely a to po registraci na školní či pracovní e-mail.



## 6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsou popsány základní vlastnosti simulačních programů a jejich simulační prostředí. Dále práce obsahuje simulace optického přenosu kódování NRZ ve třech simulačních programech. Výsledky z těchto simulací pro přenos o rychlosti 10 Gbit/s vycházeli ve všech třech programech s určitými odchylkami. Programy OptSim a Optisystem podaly téměř podobné výkony pro přenos o rychlosti 1 Gbit/s. Program VPI při této rychlosti dokázal přenést signál v požadované úrovni do kratší vzdálenosti.

Programy od společností VPI a Optiwave a program OptSim jsou pro používání méně náročné. Je to díky přehlednému grafickému prostředí, ve kterém uživatel má vše potřebné, od knihoven s moduly po zobrazení dosažených výsledků simulací. Celé prostředí je intuitivní a snadno se ovládá.

V programech OMNeT++ a NS-3 nebyli provedeny simulace z důvodů jejich složitosti na znalosti v programování a nepříliš přehlednému prostředí. Na rozdíl od prvních třech programů podporují navíc bezdrátový přenos a simulace na vyšších vrstvách.

# LITERATURA

- [1] Optiwave Systems Inc. *OptiBPM Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/products/component-design/optibpm/bpm-overview/>>.
- [2] Optiwave Systems Inc. *OptiFDTD Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/products/component-design/optifdtd/optical-fdtd/>>.
- [3] Optiwave Systems Inc. *OptiFiber Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/products/component-design/optifiber/optifiber/>>.
- [4] Optiwave Systems Inc. *OptiGrating Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/products/component-design/optigrating/optigrating/>>.
- [5] Optiwave Systems Inc. *OptiSPICE Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/products/system-and-amplifier-design/optispice/optispice/>>.
- [6] Optiwave Systems Inc. *OptiSystem Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/>>.
- [7] VPIphotonics Design Automation *VPIlinkConfigurator* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.vpiphotonics.com/Tools/LinkConfigurator/>>.
- [8] VPIphotonics Design Automation *Fiber Optics* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.vpiphotonics.com/Tools/FiberOptics/>>.
- [9] VPIphotonics Design Automation *Photonic Circuits* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.vpiphotonics.com/Tools/PhotonicCircuits/>>.
- [10] VPIphotonics Design Automation *Optical Systems* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.vpiphotonics.com/Tools/OpticalSystems/>>.
- [11] NS-3 *WHAT IS NS-3* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>>.

- [12] NS-3 *Key Technologies* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<https://www.nsnam.org/overview/key-technologies/>>.
- [13] Synopsys *OptSim Product Overview* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>>.
- [14] OMNeT++ *What is OMNeT++?* [online]. [cit. 4. 12. 2014]. Dostupné z URL: <<http://www.omnetpp.org/intro/what-is-omnet>>.
- [15] Omnet++ models *OMNeT++ models* [online]. [cit. 21. 2. 2015]. Dostupné z URL: <<http://omnetpp.org/models>>.
- [16] Wikipedia *NRZ* [online]. [cit. 29. 3. 2015]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/NRZ>>.
- [17] Jiří Vodrážka *Chybovost při přenosu digitálního signálu* [online]. [cit. 5. 4. 2015]. Dostupné z URL: <[http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/059.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/059.pdf)>.
- [18] Bc. PETR DOROCIÁK *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu* [online]. [cit. 5. 4. 2015]. Dostupné z URL: <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18751/Vliv%20polarizační%20disperze%20na%20chybovost%20optického%20kanálu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

NS-3	Network Simulator 3
BPM	Beam Propagation Method
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
UPML	Uniaxial Perfectly Matched Layer
PMD	Polarisation Mode Dispersion - Polarizační vidová disperze
DWDM	Dense WDM - Hustý vlnový multiplex
CWDM	Coarse WDM - Hrubý vlnový multiplex
RoF	Radio over Fiber
PAM	Pulse-amplitude modulation - Pulzní amplitudová modulace
DPSK	Differential Phase-Shift Keying - Diferenciální klíčování fázovým posuvem
QAM	Quadrature Amplitude Modulation - Kvadrurní amplitudová modulace
OQPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying - Offsetové kvadrurní klíčování fázovým posuvem
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
TDM	Time Division Multiplex - Multiplex s časovým dělením
OCDMA	Optical Code-Division Multiple-Access
OTDM	Optical Time Domain Multiplexing
FTTx	Fiber To The x
GPON	Gigabit PON - Gigabit pasivní optická síť
BPON	Broadband PON - Širokopásmová pasivní optická síť
FSO	Free-space optical communication - Bezdrátový optický přenos
SOA	Service Oriented Architecture

GVD	Group Velocity Dispersion
OSNR	Optical Signal-To-Noise Ratio
BPSK	Binary-Phase Shift Keying - Binární fázové klíčování
LTE	Long Term Evolution - Vysokorychlostní mobilní internet 4G
OSPF	Open Shortest Path First - Směrovací protokol
BGP	Border Gateway Protocol - Směrovací protokol
TCP	Transmission Control Protocol - Transportní protokol
UDP	User Datagram Protocol - Transportní protokol
MPLS	Multiprotocol Label Switching - Multiprotokolové přepojování podle návěští
LDP	Label Distribution Protocol - Protokol v MPLS
PPP	Point-to-Point Protocol
MAC	Media Access Control - Identifikátor síťového zařízení
NRZ	Non Return To Zero - Kódování se dvěma stavy
BER	Bit Error Rate - Bitová chybovost
$\mu_1$	střední hodnota úrovně logické jedničky
$\mu_0$	střední hodnota úrovně logické nuly
$\sigma_1$	rozptyl hodnot úrovně logická jedna
$\sigma_0$	rozptyl hodnot úrovně logická nula
$N_E$	počet chybných bitů
$N_A$	počet všech bitů

# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah CD

46

## **A OBSAH CD**

- Bakalářská práce v elektronické podobě
- Modely k jednotlivým programům